



УДК 624.012.04-52
https://doi.org/10.23947/2949-1835-2022-1-3-24-34

Научная статья

Изменение относительных деформаций в композитных материалах центрально сжатых железобетонных стоек

С. В. Георгиев ✉, А. И. Соловьева, Д. Р. Маилян

Донской государственный технический университет, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1
✉ sergey.georgiev@bk.ru

Аннотация

Введение. В работе приведены экспериментальные данные изменения значений относительных деформаций композитных материалов внешнего армирования, замеренных при испытании железобетонных усиленных стоек. В экспериментальных исследованиях изучалось поперечное и продольное композитное усиление, состоящее из углеткани и углеламинатов (углестержней). Экспериментальные значения относительных деформаций в композитных материалах усиления дают возможность определить зоны наиболее и наименее напряжённых участков композитных материалов. Целью данного исследования является определение зон наиболее и наименее нагруженных участков композитного усиления внецентренно сжатых железобетонных стоек. Это необходимо для создания новых схем наиболее эффективных вариантов усиления. Для достижения поставленной цели были выполнены следующие задачи: изготовлены и испытаны пять железобетонных усиленных стоек; в процессе испытания были наклеены тензодатчики, которые позволили определять изменения относительных деформаций композитных материалов на всех уровнях нагружения; все данные относительных деформации композитных материалов были обработаны, проанализированы и представлены в виде графиков.

Материалы и методы. В процессе испытания железобетонных гибких стоек были получены данные по изменению относительных деформаций в композитных материалах. Измерения производились тензодатчиками базой 2 см, наклеенными вдоль волокон композитного усиления. Зоны измерения относительных деформаций выбирались согласно характеру работы композитного материала. Всего в работе рассматривались результаты испытания пяти железобетонных стоек, в которых углепластиковые ткани располагались в поперечном направлении, а углестержни и ламели — в продольном. Зоны расположения тензодатчиков на композитных материалах приведены на схемах для каждого образца в отдельности. Показания тензодатчиков представлены в виде графиков изменения относительных деформаций по отношению к уровням нагрузки. После каждого графика приведены численные значения максимальных относительных деформаций с определением характера работы композитных материалов в растянутых и сжатых гранях колонн.

Результаты исследования. В результате проведённого исследования были получены данные изменения относительных деформаций композитных материалов, при этом, датчики, расположенные на поперечных хомутах работают примерно одинаково с относительной деформацией не превышающей $1,8\times10^{-3}$. Такие деформации существенно ниже предельных, что является доказательством несовместной работы существующей конструкции и материала усиления на предельных стадиях нагружений. При большом зазоре между композитными хомутами элементы усиления практически не работают и предельные деформации не превышают $0,6\times10^{-3}$.

Обсуждение и заключения. В результате обработки изменения относительных деформаций, характеризующих уровень напряжения композитных материалов, были сделаны выводы, позволяющие утверждать, что в сжатой зоне максимальная деформация не достигает предельных значений для композитных материалов, следовательно, количество слоёв поперечного усиления можно уменьшать. Для композитных материалов, расположенных в продольном направлении, было установлено преждевременное разрушение композитных ламелей, что позволило

сделать вывод об отсутствии совместной работы материалов усиления и бетона конструкции на предельных разрушающих нагрузках.

Ключевые слова: бетон, железобетон, сталь, углепластик, композитная арматура, усиление, деформации, напряжение.

Для цитирования. Георгиев, С. В. Изменение относительных деформаций в композитных материалах центрально сжатых железобетонных стоек / С. В. Георгиев, А. И. Соловьева, Д. Р. Маилян // Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий. — 2022. — Т. 1, № 3. — С. 24–34. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2022-1-3-24-34

Original article

Change in Relative Deformations in Composite Materials of Centrally Compressed Reinforced Concrete Struts

Sergey V. Georgiev ✉, **Anastasia I. Solovyeva, Dmitriy R. Mailyan**

Don State Technical University, Gagarin sq., 1, Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ sergey.georgiev@bk.ru

Abstract

Introduction. The paper presents experimental data on the change in the values of relative deformations of composite materials of external reinforcement, measured during testing of reinforced concrete pillars. In experimental studies, transverse and longitudinal composite reinforcement was studied, consisting of carbon fabric and carbon laminates (carbon rods). The experimental values of relative strains in composite reinforcement materials make it possible to determine the zones of the most and least stressed sections of composite materials. The purpose of this study is to determine the zones of the most and least loaded areas of composite reinforcement of eccentrically compressed reinforced concrete pillars. This is necessary to create new schemes for the most efficient amplification options. To achieve this goal, the following tasks were completed: five reinforced concrete pillars were manufactured and tested; during the test, strain gauges were glued, which made it possible to determine changes in the relative deformations of composite materials at all levels of loading; all data of relative deformations of composite materials were processed, analyzed and presented in the form of graphs.

Materials and methods. In the process of testing reinforced concrete flexible struts, data were obtained on the change in relative deformations in composite materials. The measurements were made by strain gauges with a base of 2 cm glued along the fibers of the composite reinforcement. The zones for measuring relative deformations were chosen according to the nature of the work of the composite material. In total, the work considered the results of testing five reinforced concrete racks, in which carbon fiber fabrics were located in the transverse direction, and carbon rods and lamellas were located in the longitudinal direction.

Results. As a result of the study, data on changes in the relative deformations of composite materials were obtained, while the sensors located on the transverse clamps work approximately the same with a relative deformation not exceeding 1.8×10^{-3}. Such deformations are significantly lower than the limiting ones, which is evidence of the incompatibility of the existing structure and the reinforcement material at the limiting stages of loading. With a large gap between the composite clamps, the reinforcement elements practically do not work and the limiting deformations do not exceed 0.6×10^{-3}.

Discussion and Conclusions. As a result of processing the change in relative strains characterizing the stress level of composite materials, conclusions were drawn that allow us to state that in the compressed zone the maximum strain does not reach the limit values for composite materials, therefore, the number of transverse reinforcement layers can be

reduced. For composite materials located in the longitudinal direction, premature destruction of composite lamellas was established, which made it possible to conclude that there was no joint work of reinforcement materials and concrete of the structure at ultimate breaking loads.

Keywords: concrete, reinforced concrete, steel, carbon fiber, composite reinforcement, reinforcement, strain, stress.

For citation. S.V. Georgiev, A.I. Solovyeva, D.R. Mailyan. Change in relative deformations in composite materials of centrally compressed reinforced concrete struts. Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning, 2022, vol. 1, no. 3, pp. 24–34. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2022-1-3-24-34

Введение. Вопросами усовершенствования строительства новых и восстановления (модернизации) существующих несущих конструкций зданий и сооружений в России занимались такие учёные как Шилин А. А., Мухамедиев Т. А., Маилян Д. Р. и др., работы которых, отразились в [1–3]. На сегодняшний день обществу необходимо предоставить новые системы усиления, позволяющие в короткие сроки без существенных внешних изменений произвести усиление конструкций. От решения поставленной задачи зависит и дальнейший рост промышленности других сфер.

При необходимости усиления несущих конструкций зданий и сооружений активно используются новые методы на основе использования композитных материалов [4, 5]. Наибольшую эффективность показали углепластиковые системы усиления, отличающиеся высокими прочностными свойствами и схожим с металлом модулем упругости [6], обеспечивающим совместную работу материалов усиления и бетона. Однако композитные материалы отличаются от традиционных (бетона и металла) своей высокой стоимостью. Поэтому все работы, направленные на поиски наиболее рационального использования материалов усиления, являются актуальными и перспективными.

В рамках диссертационной работы по определению эффективности композитных материалов при усилении внецентренно сжатых гибких железобетонных стоек, программа которой представлена в статье [7], были произведены замеры относительных деформаций композитных материалов тензодатчиками для дальнейшего определения напряжения в материалах усиления. Цель данного исследования заключается в определении наиболее нагруженных элементов усиления и, наоборот, выявлении неэффективных для дальнейшей разработки новых схем усиления внецентренно сжатых железобетонных конструкций.

Материалы и методы. В анализ данной работы входят результаты экспериментальных исследований. Результаты ранее проделанных работ по выявлению эффективности композитных материалов представлены в работах [8–10].

В данной работе рассматриваются центрально сжатые стойки, усиленные композитными материалами в поперечном направлении. Также приведены результаты пробных испытаний, не рекомендуемых сводом правил по усилению композитными материалами, по выявлению эффективности композитных материалов, расположенных в продольном направлении в сжатой зоне бетона, на увеличение прочности стоек.

Полная информация о характеристиках опытных образцов, методики усиления и испытания приведены в работах [11–13].

Ниже приведены основные данные опытных образцов для понимания вопроса исследования.

Габаритные размеры опытных образцов составляли 125(h)×250×1200 (мм). Внутренний металлический каркас был выполнен из 4 стержней ØА500, поперечное армирование было выполнено из вязаных хомутов Ø6 В500. На приопорных участках стоек были установлены по шесть металлических сеток для предотвращения смятия.

Усиление стоек выполнялось из углеткани в виде хомутов шириной 50 или 100 мм, в качестве продольного усиления использовались углеламинаты габаритами 50×1,4 мм или углестержни диаметром 8 мм.

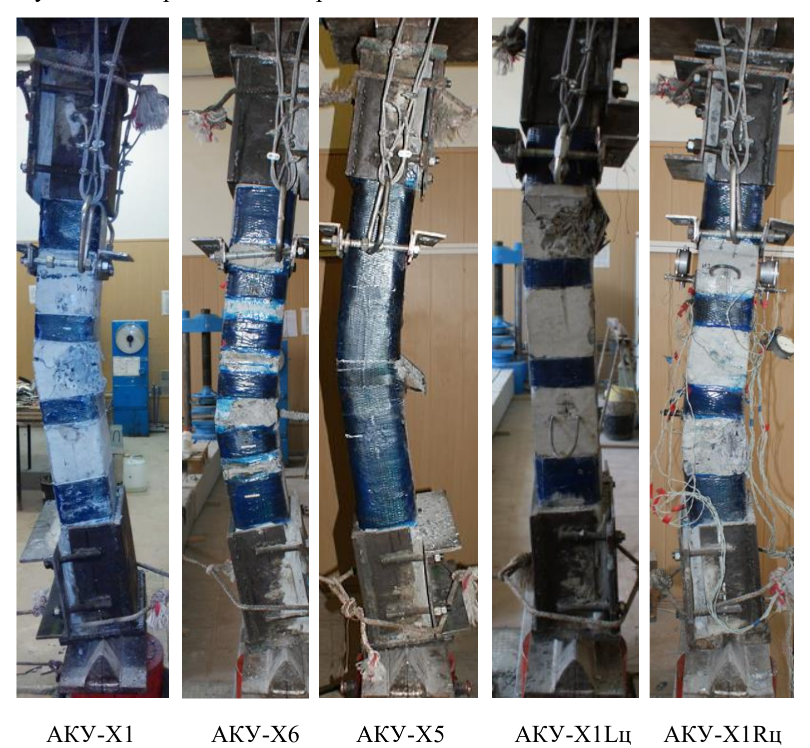
Испытание проводилось ступенчато возрастающей нагрузкой, уровнями, равными 10 % от разрушающей нагрузки, с выдержкой по 10 минут на каждом этапе.

Железобетонные стойки испытывались при центральном загружении. Нагрузка передавалась через специально изготовленные ножи, которые устанавливались в проделанные прорези на оголовниках. Металлические оголовники надевались на оба конца стоек. Между пластиной оголовника и конструкцией заливался цементный раствор с целью равномерной передачи нагрузки. Центральное сжатие контролировалась индикаторами, наклеенными на тело бетона, с базой 30 см, которые определяли относительные деформации бетона. Установка колонн осуществлялось таким образом, что относительные деформации бетона, вплоть до нагрузки, составляющей 30 % от разрушающей, развивались равномерно.

В комплексном исследовании [14] влияния эффективности композитных материалов на увеличение прочности и жесткости гибких внецентренно сжатых конструкций, в рамках которого выполнялось определение деформаций в композитных материалах, были определены относительные деформации бетона и композитов, поэтому для ряда колонн, на рис. 2–6 на схемах расположения тензодатчиков нумерация начинается не с единицы.

Все образцы испытывались при разных вариантах усиления. Так как образцы данной работы являются частью большого научного исследования [6], ниже представлен краткий шифр для опытных образцов.

Шифр образцов: А — обозначает, что стойки центрально-сжатые; К — имеют длину 1200 мм; У — усилена композитными материалами; Х — имеется наличие хомутов. Цифры 1, 2, 5 и 6, находящийся в индексе буквы Х, обозначают шаг композитных хомутов, а именно 190, 95, 0 и 64 мм соответственно; L — означает наличие продольного усиления, которое состоит из двух или четырех ламелей; R — наличие углестержней, расположенных в продольном направлении; индексы (р, с, ц) к букве L или R обозначают, что ламели или углестержни находятся в растянутой, сжатой зоне и с двух сторон соответственно. Схемы расположения и шаг хомутов композитного усиления приведены на рис. 1–6.



АКУ-Х1 АКУ-Х6 АКУ-Х5 АКУ-Х1Lц АКУ-Х1Rц

Рис. 1. Характер разрушения усиленных коротких образцов при осевом эксцентриситете приложения нагрузки e_0=0

Результаты исследования. Ниже представлены экспериментальные данные развития деформаций по отношению к силе опытных образцов. На рис. 2–5 слева указывается схема расположения тензодатчиков (Т), справа — график изменения относительных деформаций композитных материалов εf в зависимости от силы N.

АКУ–Х₁

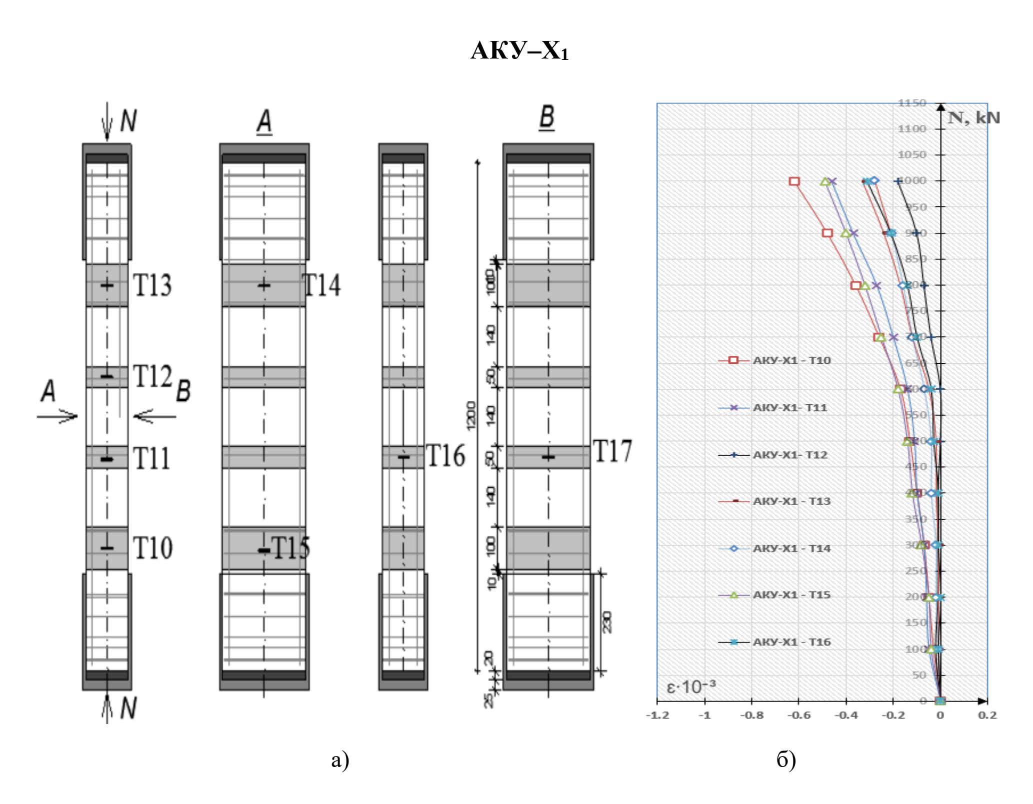


Рис. 2. Определение относительных деформаций в композитных материалах стойки шифра АКУ-Х₁ при e_0=0 и гибкости λ_h=10: а) схема расположения тензодатчиков; б) графики определения относительных деформаций композитных материалов (ε-N) (рисунок авторов)

АКУ–Х₁ — центрально сжатая стойка, усиленная в поперечном направлении хомутами, расстояние в свету между которыми равно 140 мм. Хомуты, расположенные около оголовников, имеют ширину 100 мм, в середине колонны расположены хомуты шириной 50 мм. Всё поперечное усиление выполнялось из трех слоев углеткани. В процессе испытания измерялись относительные деформации, возникающие в материале усиления. Учитывая отсутствие на момент проведения опытов данных о распределении напряжений в поперечной арматуре хомутов, тензодатчики наклеивались на все четыре стороны конструкции. Четыре тензодатчика устанавливались на ребро конструкции, при этом определялась деформация во всех четырех хомутах.

Такое решение было сделано для определения распределения напряжений во всех хомутах в зависимости от высоты расположения хомута на колонне.

Остальные тензодатчики устанавливались на противоположную и боковые грани с целью фиксированная напряжения в хомуте, в месте разрушения колонны.

Согласно показаниям тензодатчиков можно сделать следующие выводы.

Во всех хомутах наблюдаются небольшие относительные деформации в композитных материалах. Значения варьируются от $0{,}2\times10^{-3}$ до $0{,}6\times10^{-3}$.

Относительные деформации в хомутах изменяются до нагрузки 0,6Nult по касательной, при этом предельные деформации не превышает $0{,}1\times10^{-3}$. При уровнях нагрузки от 60 до 100 % наклон касательной меняется.

Можно сделать вывод, что композитные хомуты до уровня нагрузки 60 % не включаются в работу, а при превышении 60 % начинают вступать в работу вплоть до разрушения бетона между хомутами. В работе [14] приведён сравнительный анализ прочности данной стойки с аналогичной эталонной, не усиленной, при этом прироста прочности не было зафиксировано, что в принципе и подтверждается показаниями тензодатчиков.

В ребре конструкции, на которой наклеены 4 тензодатчика по всей длине колонны, относительные деформации разные и зависят от расположения относительно разрушенной зоны бетона, но расхождение относительных деформаций не превышает $0{,}4\times10^{-3}$.

Тензодатчик под номером 17 вышел из строя в процессе испытания по техническим причинам при уровне нагрузки примерно 50 % от разрушающей.

Согласно показаниям тензодатчиков можно сделать вывод, что данный шаг композитных хомутов слишком большой, и бетон конструкции разрушается между хомутами.

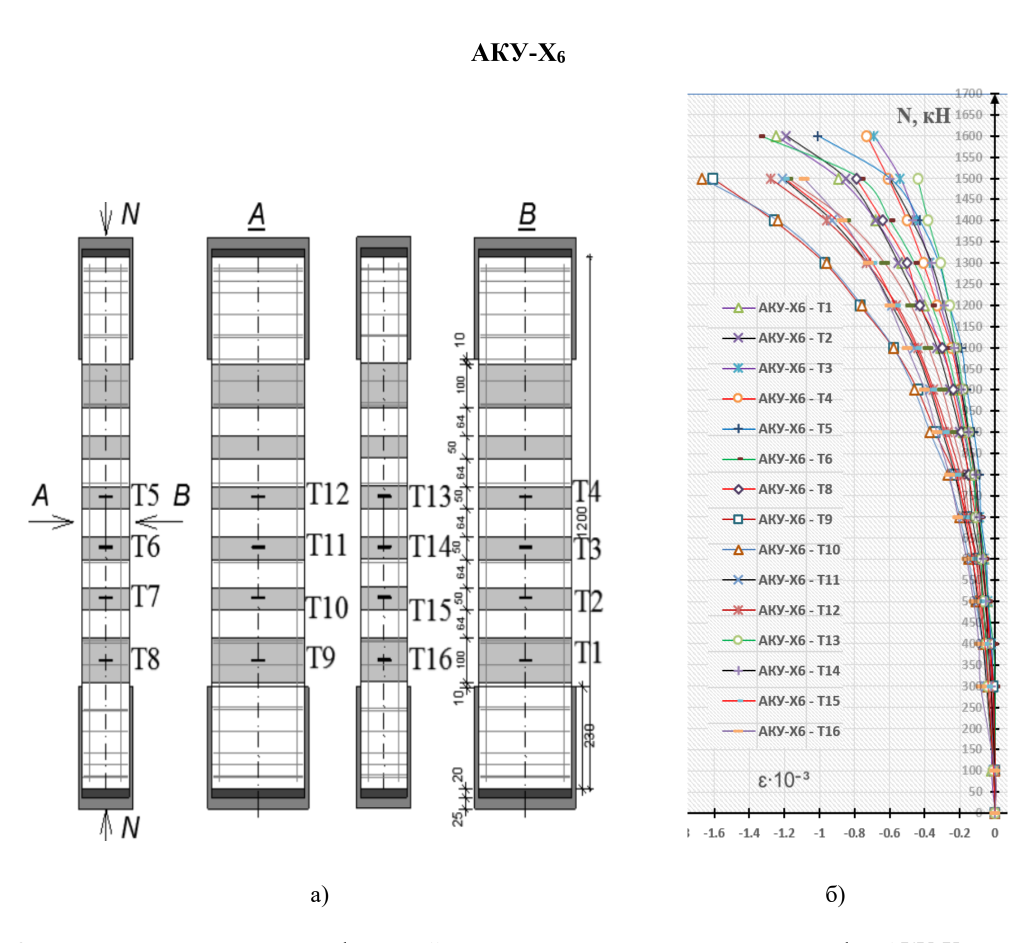


Рис. 3. Определение относительных деформаций в композитных материалах стоики шифра АКУ-Х6 при e_0=0 см и гибкости λ_h=10: а) схема расположения тензодатчиков; б) графики определения относительных деформаций композитных материалов (ε–N) (рисунок авторов)

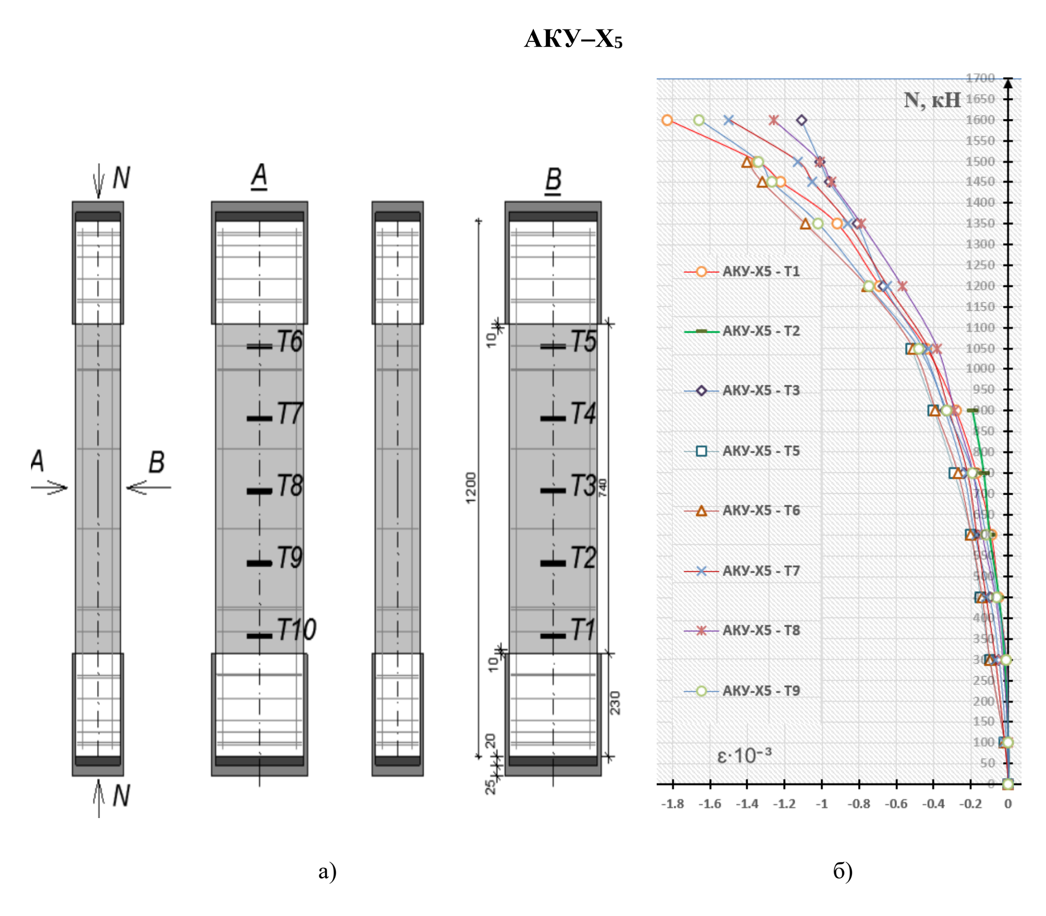
АКУ–Х6 — железобетонная стойка, усиленная композитными материалами с расстоянием в свету, равным 64 мм. На колонну было наклеено 16 тензодатчиков таким образом, чтобы определить деформации композитных материалов с 4 сторон хомута.

Результаты показания тензодатчиков следующие: в области разрушения колонны, где установлены тензодатчики под номером 9 и 10, относительные деформации композитных материалов составили $1{,}6\times10^{-3}$ и $1{,}7\times10^{-3}$.

На противоположной грани, на хомуте, где установлены тензодатчики 1 и 2, относительные деформации составляли 1,3×10^{-3}. Примерно такое же значение деформаций показали тензодатчики, наклеенные в зоне разрушения на ребрах колонн.

По мере отдаления от зоны разрушения, судя по показаниям тензодатчиков под номером 11 и 12 (в разрушенной грани) и 14 и 13 (в ребре тех же хомутов), относительные деформации уменьшаются тем больше, чем дальше от зоны разрушения. Значения относительных деформаций варьируются от 0,4×10^{-3} до 1,2×10^{-3}.

АКУ–Х$_5$



а) б)

Рис. 4. Определение относительных деформаций в композитных материалах стоики шифра АКУ–Х$_5$ при e_0=0 см и гибкости λ_h=10: а) схема расположения тензодатчиков; б) графики определения относительных деформаций композитных материалов (ε–N) (рисунок авторов)

АКУ–Х$_5$ — железобетонная, усиленная обоймой, стойка. Обойма выполнялась из углеткани в 3 слоя. Тензодатчики были наклеены равномерно по длине колонн на наиболее широких гранях.

Тензодатчики под номером 4 и 10 были по техническим причинам выведены из строя при уровне нагрузки, не превышающей 50 %. Показания тензодатчиков номер 2 и 5 перестали определяться при уровнях нагрузки 900 и 1050 кН соответственно.

Согласно полученным относительным деформациям в композитных материалах можно сделать следующие выводы: вне зависимости от того, куда была выгнута стойка в процессе испытания, относительные деформации бетона в среднем были равны от 1,1×10^{-3} до 1,8×10^{-3}. При этом наибольшие деформации были внизу опытного образца, согласно показанию тензодатчика номер 1.

Из этого можно сделать вывод, что напряжения в усиленном образце развивались равномерно вплоть до разрушения.

АКУ–$X_1L_ц$

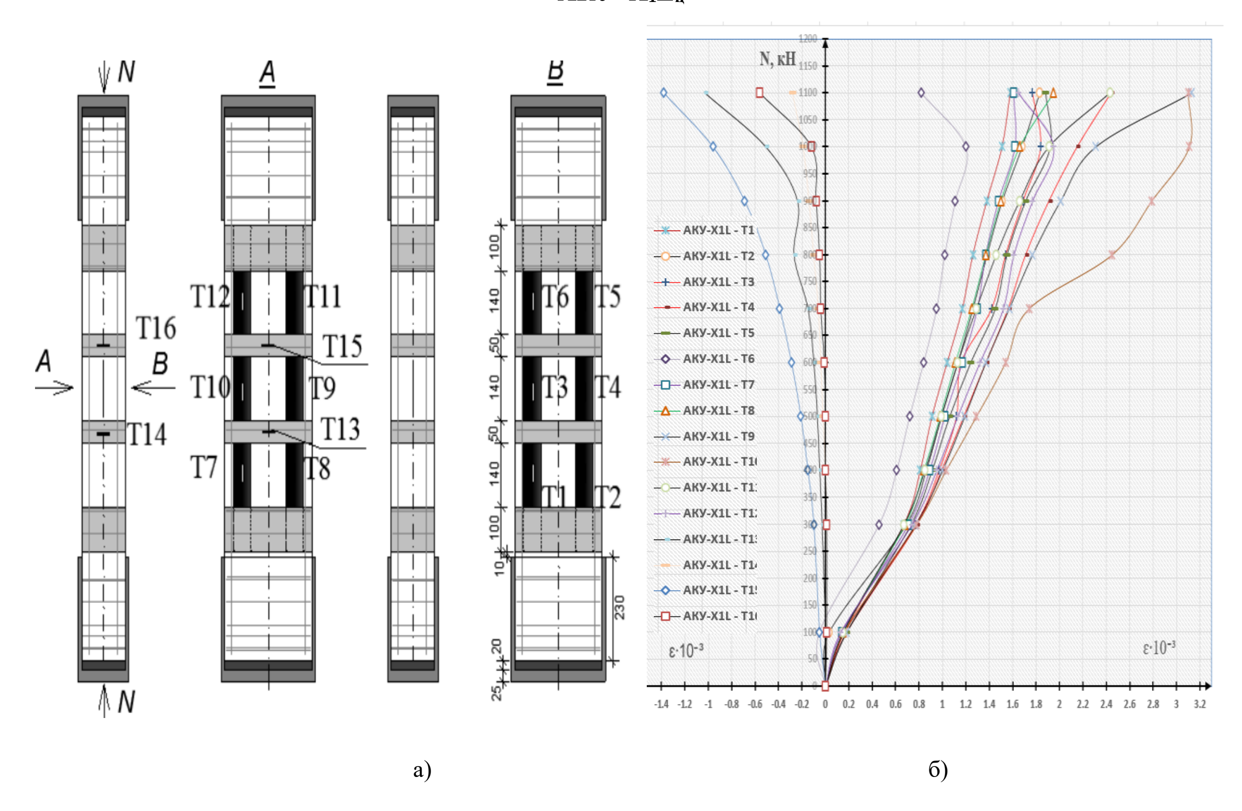


Рис. 5. Определение относительных деформаций в композитных материалах стоики шифра АКУ–X_1Lц при e_0=0 см и гибкости λ_h=10: а) схема расположения тензодатчиков; б) графики определения относительных деформаций композитных материалов (ε–N) (рисунок авторов)

АКУ–X_1Lц — железобетонная, усиленная композитами в продольном и поперечном направлении, стойка. В качестве продольного усиления использовались углепластиковые ламели шириной 5 см и толщиной 1,4 мм. Ламели наклеивались на специальную высокопрочную шпаклёвку.

В качестве поперечного усиления использовались хомуты по варианту стойки АКУ-Х1. В основном тензодатчики были наклеены на продольном усилении. Четыре тензодатчика были наклеены на поперечные хомуты, расположенные в центре стойки, на широкой и узкой грани конструкции.

Результаты показаний тензодатчиков: тензодатчики номер 15 и 13 были наклеены на хомуты, расположенные в зоне разрушения. Их относительные деформации варьировались от 1×10^{-3} до $1{,}4\times10^{-3}$. В ребре показания тензодатчиков были существенно меньше и находились в области от $0{,}3\times10^{-3}$ до $0{,}57\times10^{-3}$.

Анализ результатов тензодатчиков в продольных углепластиковых ламелях показал, что относительные деформации варьировались от 1,6×10-3 до 2,4×10-3, тензодатчики под номером 9 и 10, которые находились в зоне разрушения колонны, показали относительные деформации, превышающие 3,0×10-3.

Стоит отметить, что в процессе эксперимента было зафиксировано разрушение ламелей с последующим выпучиванием и отрывом от тела бетона.

АКУ–X_1Rц — железобетонная стойка, усиленная хомутами по аналогии со стойкой АКУ–X_1. Дополнительно были установлены с обеих сторон, с наиболее широкой грани колонны, по 2 углестержня. В теле бетона были прорезаны штробы, в которых были установлены на высокопрочной шпаклёвке углестержни. Тензодатчики под номерами 1, 3, 4, 6, 7, 9 были наклеены в местах установки углестержней. Так как углестержни были утоплены в тело бетона и сверху зашпаклёваны высокопрочной шпаклёвкой, то тензодатчики наклеивались на шпаклёвку, следовательно определить истинные деформации в композитном материале не представляется возможным.

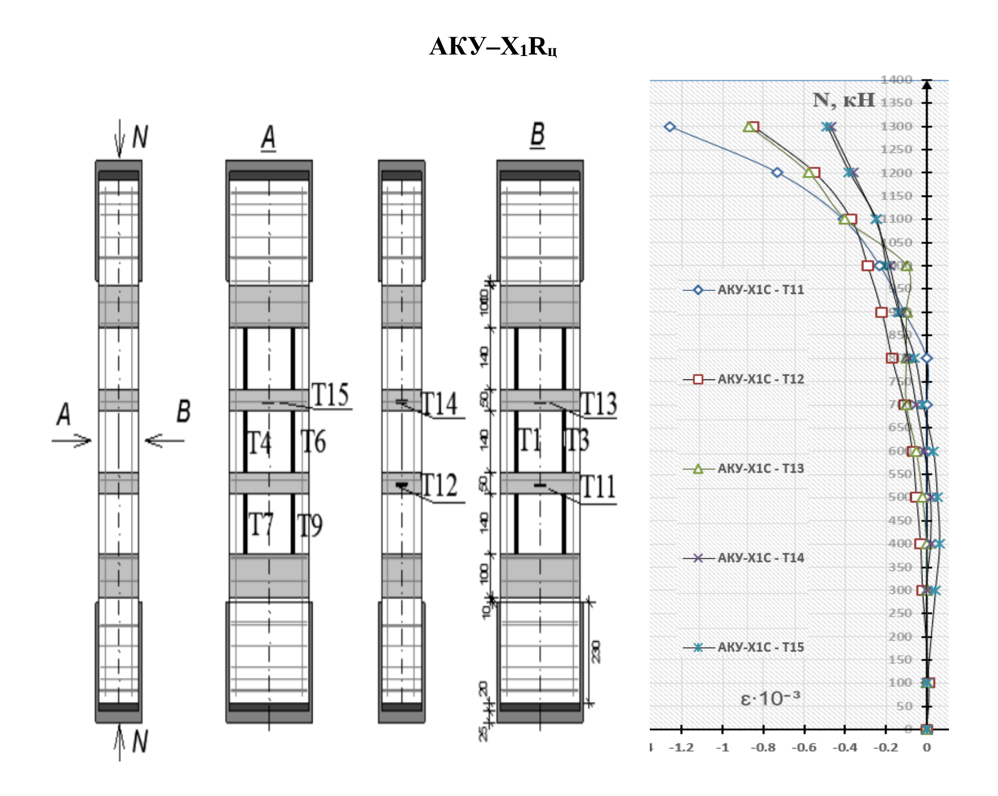


Рис. 6. Определение относительных деформаций в композитных материалах стоики шифра АКУ–$X_1R_ц$ при e_0=0 см и гибкости λ_h=10: а) схема расположения тензодатчиков; б) графики определения относительных деформаций композитных материалов (ε-N) (рисунок авторов)

Согласно показаниям тензодатчиков, наклеенных на поперечное усиление, наибольшие деформации были в хомуте в зоне разрушения (тензодатчик номер 11). Относительная деформация композита была равна $1{,}27\times10^{-3}$.

Показания датчиков 12 и 13 практически совпали. Хомут, на который был наклеен тензодатчик 13, находился на грани разрушения колонны, а датчик под номером 12 находился на хомуте в зоне наибольшего разрушения конструкции, то есть в нижней части колонны. Относительные деформации были равны $0{,}9\times10^{-3}$.

Датчики под номером 14 и 15 находились в наиболее удалённой зоне от разрушения из тех хомутов, на которых замерялись деформации, на противоположной грани и на ребре конструкции их деформации были меньше всего и составляли $0{,}5\times10^{-3}$.

Обсуждение и заключения. Согласно результатам деформаций в композитных материалах можно сделать следующие выводы:

– наибольшие деформации в хомутах поперечного усиления наблюдаются на наиболее широкой грани колонн;

– значение предельных относительных деформаций зависит от шага композитных хомутов. Установлена закономерность: чем меньше шаг хомутов, тем больше деформации в композитах;

– деформации в композитных материалах в обойме развивается практически равномерно, но предразрушающие нагрузки растут там, где зона бетона наиболее слабая.

Библиографический список

1. Шилин, А. А. Внешнее армирование железобетонных конструкций композитными материалами / А. А. Шилин, В. А. Пшеничный, Д. М. Картузов // ОАО «Издательство Стройиздат». — 2007. — С. 184.

2. Мухамедиев, Т. А. Проектирование усиления железобетонных конструкций композиционными материалами / Т. А. Мухамедиев // Бетон и железобетон. — 2013. — № 3. — С. 6–8.

3. Польской, П. П. Прочность и деформативность коротких усиленных стоек при малых эксцентриситетах / П. П. Польской, Д. Р. Маилян, С. В. Георгиев // Инженерный вестник Дона. — 2014. — № 4–1 (31). — С. 138.

4. Шилин, А. А. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами / А. А. Шилин, В. А. Пшеничный, Д. М. Картузов // Стройиздат. — 2004. — С. 144.

5. Чернявский, В. А. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами / В. А. Чернявский, Е. З. Аксельрод // Жилищное строительство. — 2003. — № 3. — С. 15–16.

6. Устинов, Б. В. Исследование физико-механических характеристик композитных материалов (КПМ) / Б. В. Устинов, В. П. Устинов // Известия вузов. Строительство. — 2009. — № 11–12. — С. 118–125.

7. Польской, П. П. О программе исследования сжатых железобетонных элементов, усиленных композитными материалами на основе углепластика / П. П. Польской, С. В. Георгиев // Научное обозрение. — 2014. — № 10–3. — С. 662–666.

8. Polskoy, P. The strength of compressed structures with cfrp materials reinforcement when exceeding the cross-section size / P. Polskoy, D. Mailyan, S. Georgiev, V. Muradyan // E3S Web of Conferences. — 2018. — С. 02060.

9. Польской, П. П. О несущей способности усиленных коротких стоек при больших эксцентриситетах / П. П. Польской, Д. Р. Маилян, С. В. Георгиев // Инженерный вестник Дона. — 2014. — № 4–1. URL: https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2631.

10. Маилян, Д. Р. Свойства материалов, используемых при исследовании работы усиленных железобетонных конструкций / Д. Р. Маилян, П. П. Польской, С. В. Георгиев // Инженерный вестник Дона. — 2013. — № 2 (25). URL: https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1673.

11. Польской, П. П. Методики усиления композитными материалами и испытания железобетонных элементов / П. П. Польской, А. Михуб, С. В. Георгиев // Инженерный вестник Дона. — 2013. — № 2 (25). — С. 112.

12. Маилян, Д. Р. Конструкция каркасов и схемы испытания опытных стоек, усиленных углепластиком / Д. Р. Маилян, П. П. Польской, С. В. Георгиев // Научное обозрение. — 2014. — № 10–3. — С. 667–670.

13. Маилян, Д. Р. Методики усиления углепластиком и испытания коротких и гибких стоек / Д. Р. Маилян, П. П. Польской, С. В. Георгиев // Научное обозрение. — 2014. — № 10–2. — С. 415–418.

14. Польской, П. П. Вопросы исследования сжатых железобетонных элементов, усиленных различными видами композитных материалов / П. П. Польской, С. В. Георгиев // Инженерный вестник Дона. — 2013. — № 4. URL: https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2134.

Поступила в редакцию 16.11.2022

Поступила после рецензирования 25.11.2022

Принята к публикации 30.11.2022

Об авторах:

Георгиев Сергей Валерьевич – доцент кафедры «Железобетонные и каменные конструкции» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, ORCID, sergey.georgiev@bk.ru.

Соловьева Анастасия Ивановна – инженер и ассистент кафедры «Железобетонные и каменные конструкции» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), магистр, 98rosignol@mail.ru.

Маилян Дмитрий Рафаэлович – профессор кафедры «Железобетонные и каменные конструкции» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, ORCID, dmailyan868@mail.ru.

Заявленный вклад авторов:

Георгиев С.В. — анализ результатов исследований, проведение расчетов, формирование выводов. Д. Р. Маилян — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, научное руководство, корректировка выводов. А. И. Соловьева — выполнение расчетов, подготовка текста.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.